

コルトノズル付リングプロペラに関する実験的研究

Experimental Study on the Kort - nozzle propeller provided with a Ring

古 川 不二夫* 吉 田 稔**

Fujio Furukawa Minoru Yoshida

The application of the Kortnozzle incorporating Propeller to a tugbaot, etc., brings about such amazing advantage that 45% increase can be obtained in the bollard towing force i.e. in the death pull, and a 25% increase can be obtained even in the self propulsion.

On the other hand, the conventional propeller provided with Kortnozzle has the following disadvantage. Namely, in the conventional propeller the gap existing between the Kortnozzle and the outer edge of the propeller blade is considerably large. Therefore, drifting wood aticks or other solid substances in the water are frequently caught in the gap, causing breakage of the propeller blade.

In order to prevent troubles mentioned above, the model test of the Kortnozzle propeller provided with a ring was carried out. Now, the experimental result shows that though the aim was satisfactorily attained the propeller performance was considerably decreased, not only because of increase of frictional resistance of a ring but also because of occurrence of unexpected additional circulation with source and sink around a ring.

Therefore it was found that the application of a ring propeller to the Kortnozzle is not advisable.

1. 緒 言

ノズルプロペラに関する研究は古くからおこなわれており、1934年にKortによる研究が発表されて以来この種のプロペラ装置は「コルトノズルプロペラ」として、広く斯界に知られるようになった。

戦後1950年にいたり造船界の目醒ましい復興に次ぐ躍進の時期を迎へ、この種のノズルプロペラの研究もその特性が再認識されるとともに盛んになり、なかんずく低速高荷重の作動状態においてノズルを装着しない単独プロペラに較べて飛躍的な推力増加を得られるという利点が着目され、Tug Boat, Trawler, Cable Ship etc. の作業船用推進器として広く採用されるようになってきた。最近はやりの Bow Thruster

などもこの応用である。またこのプロペラの利点としては舵兼用が出来る、プロペラブレードを防護する、浅吃水時のAir drawingを防止するなどが挙げられる。しかしながら利点は同時に欠点ともなり得るもので、なかんずくノズルとブレードチップとの間のクリアランスに水中の異物を吸い込み、これが推進効率低下を引き起すのみならずブレードの析損という大事故にも累がりかねない。そこでこの欠点を防止する目的で「コルトノズル」に「リングプロペラ」を組み合わせた装置(コルトノズル付リングプロペラ)の水槽実験を実施し、その結果を考察した。

2. 実 験

2-1 実験方法

本学の回流水槽に「プロペラ単独試験機」を設置し、これに、5種類の供試モデルプロペラ（次項参照）をセットし、流速 $0\text{ m/s} \sim 1.2\text{ m/s}$ 、プロペラ廻転数 $200\text{ r.p.m.} \sim 1,550\text{ r.p.m.}$ の範囲で実験をおこない各プロペラのスラスト (Thrust)、トルク (Torque) 等を求めそのプロペラ効率を出し、各プロペラ性能の比較をおこなうとともに、「コルトノズル付リングプロペラ」のリング周辺に発生する循環流の観測を実施した。

2-1-1 実験装置

- (1) プロペラ単独試験機 (Fig 1)
- (2) 実験水槽
船舶工学科堅型回流水槽
長さ×巾×水深 = $7.8\text{ m} \times 1.1\text{ m} \times 0.6\text{ m}$
- (3) 流速計
広井式翼車型流速計
- (4) スラスト検力計 (Fig 1)
天秤式
- (5) トルク検力計 (Fig 1)

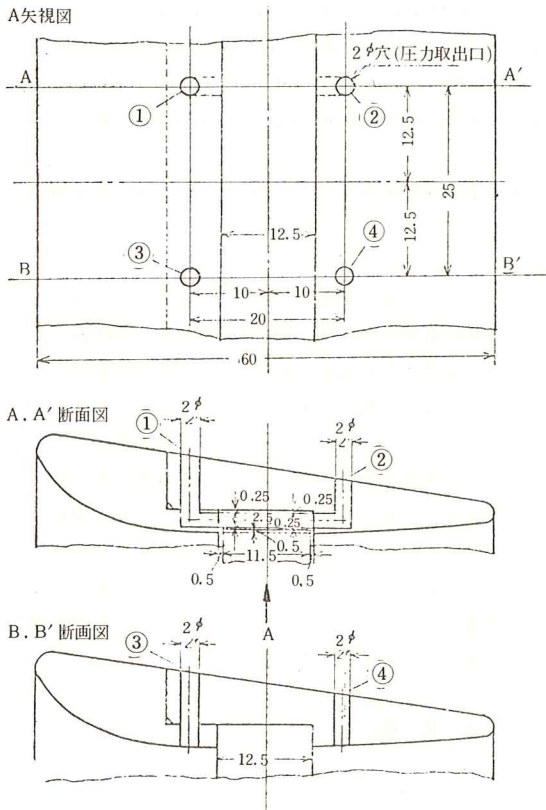


Fig. 2.

トルク用モーターに取り付けた電気抵抗線式振り動力計

(6) 廻転計

光電式廻転計 (概略値検出用)

正確な値は試験機軸にカムを取り付け自動的にペンオッシロに記録させ読みとる。

(7) 水温測定

実験前後に2本の水温計を用い、試験機前方の水面下約40cmの水温を測定しその平均値を取り、実験前後の平均値を実験日の水温とした。

2-1-2 エヤードローイング防止板

ノズルおよびプロペラの上端迄の深度は約 $D/2$ (D はプロペラ直径) としたが、廻転数の上昇とともに流速が増してくるとエヤードローイングの現象が発生してくるので防止板を設けた。

2-1-3 圧力 (静圧) の測定 (Fig 2)

ノズル部分に開けられた圧力測定孔に金属製のコックを取り付け、チューブを介してU字型水銀柱マノメーターで計測した。圧力測定孔はプロペラ前後の位置に1個ずつ、ノズル溝内の垂直壁に1個ずつ合計4ヶ所に設け、4本のチューブにより2本のU字型水銀柱マノメーターに連結した。

2-1-4 流線の写真撮影 (写真1～写真5)

プロペラおよびノズル附近、さらにリング内の水の流れを可視的にするため、染料、アルミ粉末、空気泡、トレーサーを用いて写真撮影をおこなった。

2-1-5 流線の撮影 (写真1～写真5)

染料注入器または注射器を用いて、ノズルの前方上下方向に種々位置を変えてゆき注入をおこない染料等がノズルまたはプロペラにどのような角度、どのような状態で吸い込まれるかを観測し、写真撮影をおこなった。注入器とノズルあるいはプロペラとの距離は $2\text{ cm} \sim 20\text{ cm}$ である。しかし空気泡を使用してのリング周辺の循環流の撮影には注射器先端とリング壁入口との距離は約 5 mm にとった。

2-2 供試模型

以下に述べる5種類の模型プロペラを使用した。

2-2-1 単独プロペラ (Fig 3, 表1, 2)

本実験で使用した単独プロペラの仕様および特長は次表の通りである。

2-2-2 コルトノズルプロペラ (Fig 4, 表2)

特長は次の通りである。

(i) ノズル断面は翼型で翼背面が内側になっており、プロペラに入る水流を軸に平行になるように

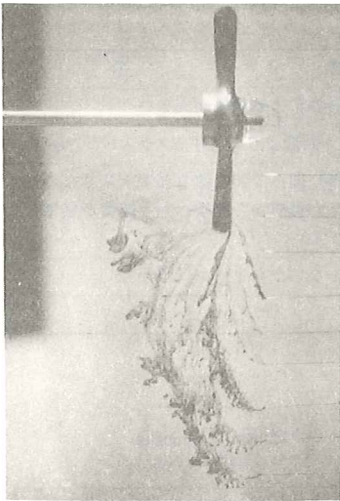


写真 1
〔単独プロペラの流線〕

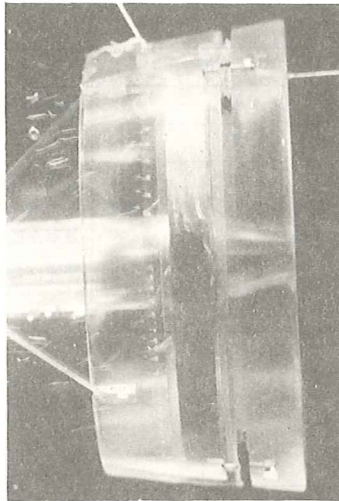


写真 2
〔リング外側の循環〕

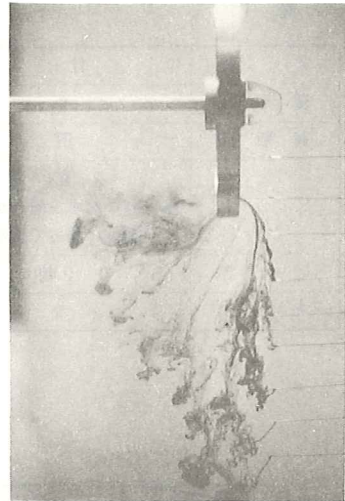


写真 3
〔リングプロペラの流線〕

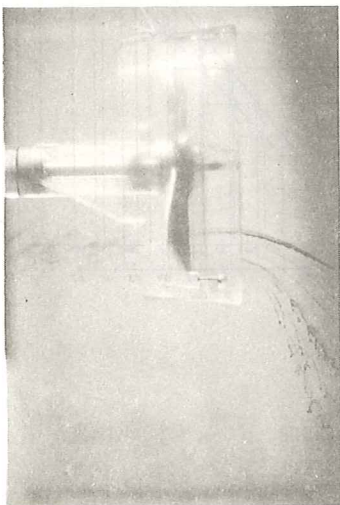


写真 4
〔コルトノズル付単独プロペラの流線〕

写真1：空気泡
写真2～5：グリセリンと
メチレンブルーの混合

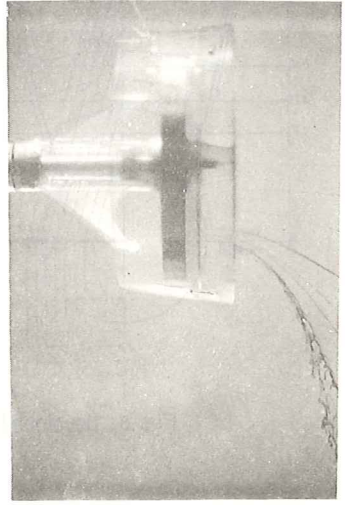


写真 5
〔コルトノズル付リングプロペラの流線〕

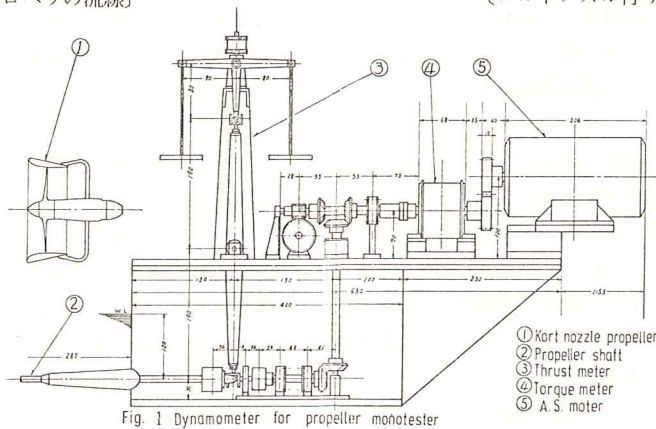


表 1

名 称	仕 様	特 徴
翼 形 状	カ プ ラ ン 型	翼後縁の随伴渦による損失が大きい
翼 断 面	円 弧 形	エアロfoil断面より発生するスラストが小さい。
ピ ッ チ	変 動 ピ ッ チ 軸方向に対する傾きが一定なので、ピッチは、翼根より翼端に向って漸次大きくなる。	翼根より翼端に向って加速流も漸次大きくなる為、圧力差を生じ、翼根から翼端へ向う速度が発生し、効率が低下する。
レ ー キ	0 (軸 対 して 直 角)	伴流は存在しないからレーキは不用
スキューバック	な し	

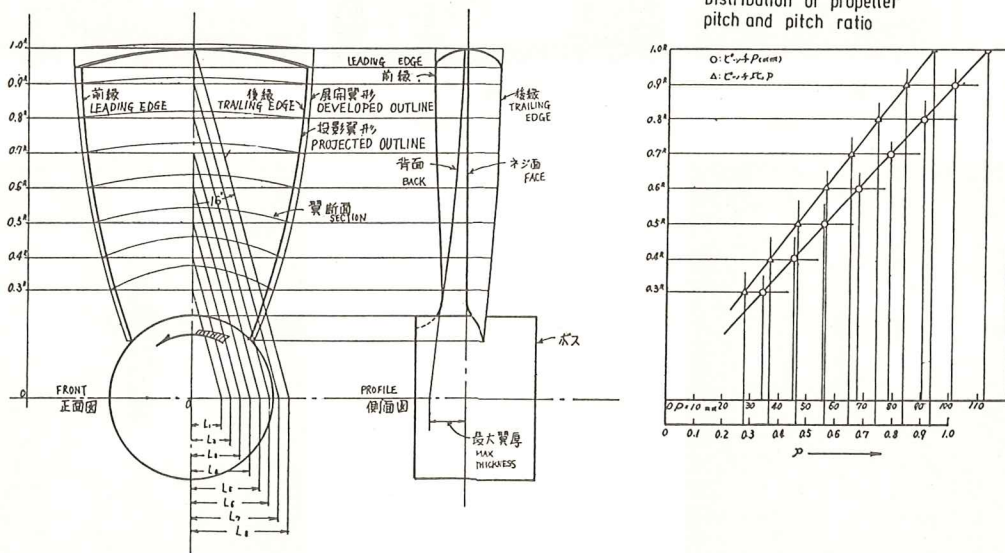


Fig. 3. Developed plan and projection of propeller blade

し、さらにプロペラを通過した加速流はそれ以上加速されない（単独プロペラに較べて）ので縮流が防止出来るとともに、プロペラ展開面積を大きくすることが出来る。

(ii) ノズル背面に大きな負圧を生じ揚力を発生し、スラスト増加の効果がある。

(iii) 前進率 ($J = V_m / D \cdot n$) 0 における牽引力が通常のプロペラに較べて30～40%も高くなる。

(iv) 以上のような理由で高荷重度を要する低速の小型曳船、トロール船、ケーブル船等作業船用舶用推進器としての利用度が高い。

(v) しかしながら独航状態ではプロペラ効率

は単独のものに較べて低く、とくに波浪中におけるノズル抵抗が大きく外洋高速船用推進器としては不適と思われる。

2-2-3 リングプロペラ (Fig 4, 表 2)

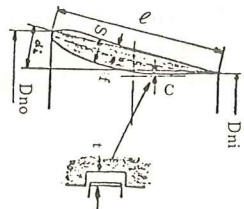
本実験で使用したリングプロペラは、現在実用化されているもののようにリング断面が翼型ではなく、ただの円筒である。したがってリング面に生ずる粘性抵抗による損失で効率は低下するが、短い円筒の中でプロペラを回転させることによって、大体のプロペラの挙動が観察されるので実用的なプロペラ設計の参考に資するものと考ええる。(リングプロペラは理想流体の中では Tip clearance 0 のノズルプロ

1. Cap nut
2. Stopper
3. Snap ring
4. Nozzle supporter
5. Outer pipe
6. Immediate pipe
7. Inner pipe
8. Ballbearing stopper
9. Thread stopper
10. Cap
11. Ballbearing

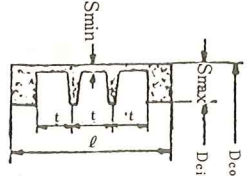


表 2. 主 要 目 表

名称	項目		数 値	備 考
	形 式		4 翼カプラン型	
プ	直 径D	mm	121.5	単独プロペラ
	全 上	mm	122.0	リングプロペラ
	ピ ッ チ 比		0.69	流体力学的ピッチ比0.79
	ピ ッ チ 分 布		変動ピッチ	翼根より翼端へ漸次増加
	展 開 面 積 比		0.6	
ロ	ボ ス 比A		0.196	
	全 上B		0.229	
	翼 幅 比		0.226	
ベ	翼 厚 比		0.051	
	レ ー キ 角 α_i		0	
ラ	翼 断 面 形 状		円弧形	
	スキューバック		0	
	材 質		黄銅板	

ノ ズ ル	外 径 D_{no}	mm	147.2	
	内 径 D_{ni}	mm	122.0	
	長 さ l	mm	60.0	
	チップクリアランス C	mm	0.25	
	ノ ズ ル 角 α_i		9.5	
	キ ャ ン パ ー f	mm	3.0	
	最 大 翼 厚 s	mm	9.5	
	キ ャ ン パ ー 比	f/l	0.05	
	翼 弦 比	s/l	0.158	
	リング押入溝の深さ(片側) t	mm	3.0	
	材 質		透明メタクリル樹脂	

リ ン グ	外 径 D_{ro}	mm	123.0	
	内 径 D_{ri}	mm	122.0	
	リ ン グ 幅 l	mm	11.5	
	リ ン グ 厚 t	mm	0.5	
	リ ン グ 角 α_r		0	
		l/D	0.13	
	材 質		黄銅板	

制 限 リ ン グ	外 径 D_{co}	mm	128.0	
	内 径 D_{ci}	mm	123.6	
	リ ン グ 幅 l	mm	12.5	
	最 大 リ ン グ 厚 S_{max}	mm	2.2	
	最 小 リ ン グ 厚 S_{min}	mm	0.5	
	材 質		SS41	

2-2-4 コルトノズル付リングプロペラ (Fig4, 表2)

これはコルトノズルプロペラの単独プロペラをリングプロペラに取り換えたものである。すなわち Blade Tip部にリングを取り付け、またノズル内側中央部に溝を切りノズル内径と Blade Tip 外径とを同じにとり、リング部の厚みだけがノズル溝に入り込んだものである。このような構造をとることによって、ノズル内側と Blade Tip 部に入り込む海洋浮遊物を防止するとともに、リング溝内に入り込むゴミもプロペラ前部の吹き出し、後部の吸い込みによる所謂循環 (Circulation) によって防止しようとするものである。またリングによりプロペラ振動もある程度軽減できるものである。

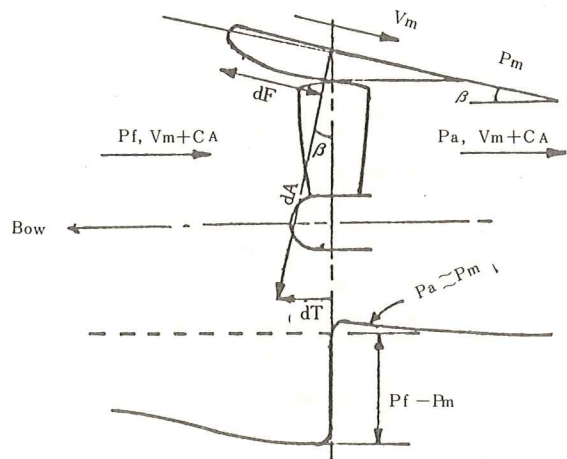


Fig. 5.

2-2-5 同上 (制限リング付) (表2)

リングの外側にTaperした溝を数条つけて、この部分生ずる前記の循環を制限しようとするものである。

2-2-6 ノズルプロペラのスラスト (Thrust)

ノズルに発生するスラストは近似的に次式

で表わされる。

$$dT = dA \sin \beta$$

$$dA = dF (P_f - P_m)$$

$$P_a = P_m \text{ ならば}$$

$$dA = dF \cdot \frac{\rho}{2} (2V_m C_A + C_A^2)$$

ただし

dF : ノズルの揚力発生面積

dT : ノズルの推力発生面積

dA : ノズルの揚力成分

β = ノズルの軸に対する角度 (迎角)

ノズルプロペラと単独プロペラの流線、流速、圧力を比較すると次図 (Fig 6) のごとくなる。

2-2-7 供試模型プロペラの特性曲線 (Fig 7 ~ Fig12)

実験結果により得られた各プロペラの特性曲線を示すとFig 7 ~ Fig12である。

ここに

K_t : スラスト係数 (Thrust coefficient) K_q : トルク係数 (Torque coefficient), η_p : プロペラ効率 (Propeller efficiency), T_t : スラスト (Thrust), Q : トルク (Torque), J : 前進率 (Advance coefficient), s : スリップ比 (Slip ratio), p : ピッチ比 (Pitch ratio), n : 廻転数 (r.p.s.), D : プロペラ直径 (m), ρ : 密度 (タンクの清水)

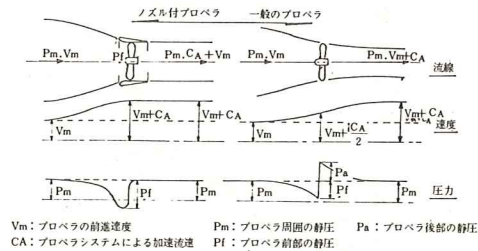


Fig. 6.

3. 実験結果および考察

3-1 コルトノズル付リングプロペラの効率

Fig12から判るごとくノズル付リングプロペラの効率は単独のものに較べて非常に落ちる。本実験では $J = 0$ で約20%, $J = 0.3$ で約26%も低下しており、この要因としては次のことが挙げられる。

- (1) リングまわりの循環による損失
- (2) リングの粘性抵抗による損失
- (3) ノズル伴流の影響

なお効率が単独、コルトノズル、リング付を問わず全部が約20%程度実物プロペラより低下しているように考えられるが、これは小型回流水槽の水流の不均一性、および模型プロペラのScale Effectさらには計測機の性能上の問題等が原因と考えられ、本実験ではやむを得ないものと考えている。

3-1-1 循環流量について

リングまわりの循環流量の計算をすると次のようになる (モグリオリフィスとみなして計算)

循環流量の主流量に対する比率 (表3)

ノズル付リングプロペラ					循環制限リング付			
J	K_p	$P (=P_2 - P_1)$	ΔP	$2 \Delta P / \rho$	ΔQ_r	$\Delta Q_r / Q_r$	ΔQ_r	$\Delta Q_r / Q_r$
		kg/m ²	$P - \Delta P_6 + \Delta P_7$ kg/m ²	m/sec	$\times 10^2$ cm ³ /sec	%	$\times 10^2$ cm ³ /sec	%
0.0	0.235	142.4	215.13	2.056	2.626	1.3	1.653	0.83
0.1	0.216	130.9	203.63	2.000	2.554	1.28	1.608	0.80
0.2	0.195	118.1	190.83	1.936	2.472	1.24	1.557	0.78
0.3	0.173	104.8	177.53	1.868	2.385	1.19	1.502	0.75
0.4	0.145	87.9	160.63	1.777	2.269	1.13	1.429	0.71
0.5	0.115	69.7	142.43	1.673	2.136	1.07	1.345	0.67
0.6	0.080	48.5	121.23	1.543	1.970	0.99	1.241	0.62

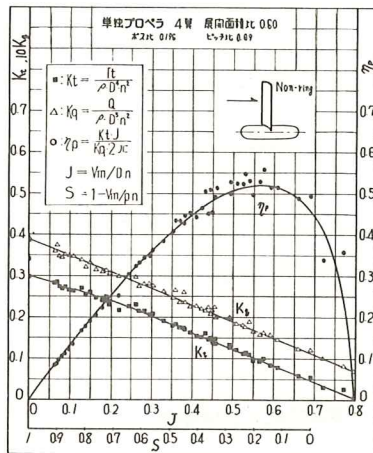


Fig.7. Characteristic of conventional propeller

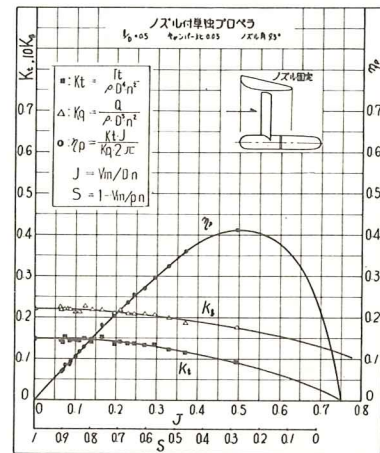


Fig.8. Characteristic of propeller only for conventional ducted propeller

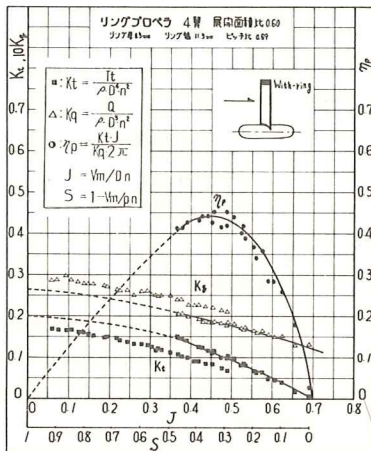


Fig.9. Characteristic of ring propeller

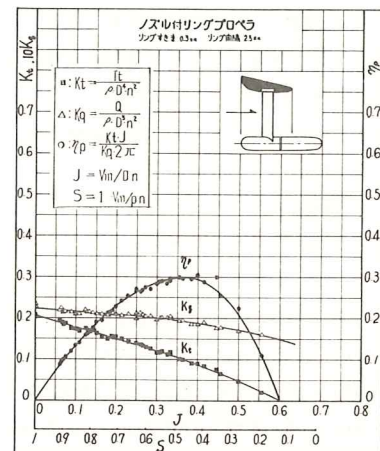


Fig.10. Characteristic of ducted ring propeller

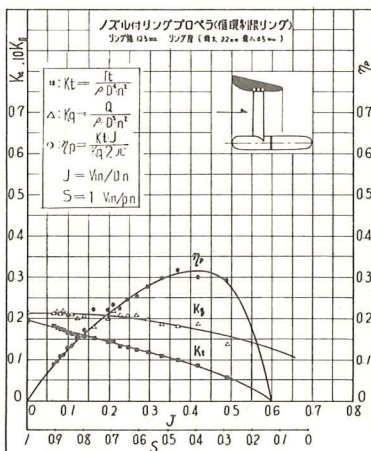


Fig.11. Characteristic of ducted propeller with circulation limiting ring

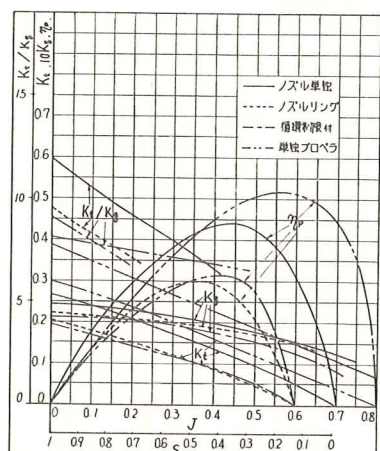
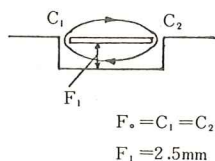


Fig.12. Comparison of characteristic for each propeller

ノズル付リングプロペラでは
 $\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3$



循環制限リング付プロペラでは
 $\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_4 + \Delta P_5$

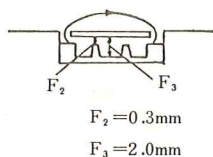


Fig. 13.

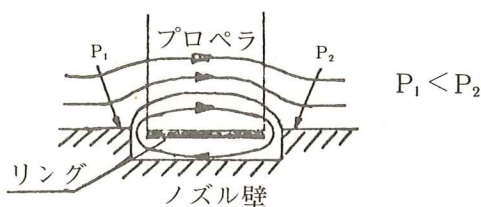


Fig. 14.

ΔP_1 : 入口損失, ΔP_2 : 排出損失, ΔP_3 : 断面
 変化損失, ΔP_4 : ラビリンス損失, ΔP_5 : 方
 向変化による損失, ΔP_6 : 摩擦損失,
 ΔP_7 : 摩擦利得 (リング廻転による)

(1) ノズル付リングプロペラ

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 - \Delta P_6 + \Delta P_7 + P$$

(2) 同上 (制限リング付)

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_4 + \Delta P_5 - \Delta P_6 + \Delta P_7 + P$$

$$P = P_2 - P_1 \text{ (リング前後の静圧差)}$$

3-1-2 リングまわりの循環に対する考察

流体はプロペラ後部の高圧側からリングとノズル壁とで形成された溝を通して、プロペラ前部の低圧側へ吹き出し再びプロペラを通る。このリングまわりの一連の循環の様子を写真3で観察することができ。この循環が水中の異物の吸い込みによるブレードチップ部の損傷を防護する効果があると考えられるが、一方においては循環損失としてスラスト低下の要因となる。こゝでの循環流量はリングの隙間とリング前後の静圧差によって決まる。その値はモグリオリフィスとみなしリングの流体摩擦による静圧差の増加を考慮した前節の計算値 (表3) から読みとると

ノズル付リングプロペラ : 約260cm/s ($J=0.0$)

~190cm/s ($J=0.6$)

同上 (循環制限付) : 約165cm/s ($J=0.0$)

~124cm/s ($J=0.6$) $n=20 \text{ r.p.s}$

程度である。

このときの循環損失としてのスラスト低下量は次のようにして概算することができる。

(a) リングまわりの循環を吹き出し (Source) および吸い込み (Sink) と考え、リングまわりのこの循環の大きさがプロペラの有効直径を減少させる一番の要因とみなして、流線の写真等をも考慮してスラストの低下量を概算する。

(b) 循環流量を体積損失とみなして概算する。

(b)による方法で計算した場合 (循環流量/主流量)の値を (表3) より読みとると

ノズル付リングプロペラ $\approx 1.3\%$ ($J=0.0$)

~0.99% ($J=0.6$)

同上 (制限リング付) $\approx 0.83\%$ ($J=0.0$)

~0.62% ($J=0.6$)

であるがノズル伴流の影響を考慮するとこの値はさらに増加するであろう。

循環損失によるスラストの低下は「ノズルプロペラ」と「リング付プロペラ」とではFig12を参照すればよく確認することが出来るが、前記(b)による方法で求めた循環流量があるものの、前進率が増してくるにしたがって両者の流量差も減少してきて、実験における全誤差等を考慮すると両者の間にスラスト低下量を決定づける程度の明確な値は見出せなかった。しかしながらFig12にみられるとおりプロペラ効率という点では、明らかに単独プロペラが一番良く次いで「ノズルプロペラ」、次いで「ノズル付リングプロペラ (制限リング付)」, 最も悪いのが「ノズル付リングプロペラ」という

順序であり、これは明らかに循環損失の影響を示しているものと考えることができるものである。

3-1-3 ノズル付リングプロペラにおける摩擦の影響

一般のプロペラ実験ではその揚力、抗力成分と較べて、粘性による摩擦抵抗は非常に小さいので、レイノルズ数のある値（臨界レイノルズ）以上では無視できるが、「ノズル付リングプロペラ」ではこれが無視できない。本実験ではこのリング摩擦の推定ができなかった所以その影響がどれ位であるか不明である。なお模型実験における臨界レイノルズは 4×10^5 位は欲しいといわれるが、本実験で使用した模型プロペラレイノルズ数は大略 1.35×10^5 で可成小さく、この面よりも尺度影響 (Scale Effect) が入っているものと考えられるがこの点も不明である。

3-1-4 ノズル伴流の影響

ノズルがプロペラを囲むことにより、プロペラ周縁の流速が増し見掛けの前進率は高くなり、その結果スラスト、トルクの低下をきたす。このようなノズルによる加速（誘導速度 Induced Velocity）は「ノズル伴流」と呼ばれるものであり、このため「ノズルプロペラ」ではスラスト、トルクが単独のものに較べて劣ってくる。「ノズル伴流」とスラスト、トルクの減少との関連は、ノズルまわりの流速分布とプロペラ特性とから得られるが、今回の実験ではノズルおよびリング周辺の細密な流速分布の測定はおこなわなかった。したがってノズル伴流の正確な値を見出すことはできなかったが、「写真1～写真5」による流線の観測より、この影響があることを推論できる。

4. 結 論

以上の考察から「コルトノズル付リングプロペラ」は、本実験の目的である海洋浮遊物等の異物吸い込みによる損傷をある程度防止することができるものと考えられる。しかしながらこの「プロペラシステム」は、実験結果より明らかなごとく「コルトノズルプロペラ」に較べても14%もの効率低下をきたしている。(Fig12)。その要因を挙げると

(1) リングまわりに生ずる循環のため見掛けの Disc Area の減少をきたし、スラストおよびトルクの低下を生じた。特に本実験では「変動ピッチカプラン型」を使用したのでこの影響大である。

(2) 小さい模型になればなるほど尺度影響が大で、

本実験に使用した模型プロペラのレイノルズ数の範囲では、比較則 (Law of Comparison) の適用に疑問が持たれる。実験値は全般的に実物より可成り効率が低下して現われてきている。

(3) リングの廻転による「ノズル伴流」の増加のためさらに粘性抵抗が増し、効率低下の因をなしている。

以上の実験結果および考察より、「コルトノズル付リングプロペラ」は「コルトノズルプロペラ」に比べてその効率がいちじるしく低下するので実用に供するには不適當なものであると判断される。

おわりに本研究に際し種々の御教示、助言をいただいた本学流体工学研究科の江頭泰教授、三菱長崎研究所長渡辺恭二氏ならびに関係各位に本誌を借りて謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) Kort, L. "Der neue Dürsensschraubeantrieb" (Werft, Rederei, Hafen 1934)
- (2) Van. Manen "Fundamentals of Ship Resistance and Propulsion" Part B Propulsion
- (3) 伊藤一男「ノズルプロペラの設計」(船の科学 Vol23 Nos 6, 7, 8)
- (4) 山県昌夫「船型学」後編(天然社)
- (5) 古屋善正他「流体工学」(朝倉書店)
- (6) プラントル「流れ学」(コロナ社)
- (7) 河田三治 "The Vortex Theory of Air Screw and Some of its Application" (造船協会々報 第37号)
- (9) "Shipping World and Shipbuilder" p.1030, July 1970